

**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIMENSI MAGNET PADA MODEL
PMSG (PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR)**

12 SLOT 8 POLE



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I
pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik**

Oleh:

FARADILLA FIKA SARI

D400170118

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

2021

HALAMAN PERSETUJUAN

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIMENSI MAGNET PADA MODEL PMSG (PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR) 12 SLOT 8 POLE


PUBLIKASI ILMIAH

oleh:

FARADILLA FIKA SARI
D400170118

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing

 dec 21/7 21

Aris Budiman S.T., M.T.

NIK. 885

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIMENSI MAGNET PADA MODEL
PMSG (PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR)
12 SLOT 8 POLE**

OLEH

FARADILLA FIKA SARI

D400170118

**Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari Senin, 26 Juli 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat**

Dewan Penguji:

1. Aris Budiman, ST.M.T

(Ketua Dewan Penguji)

2. Agus Supardi, S.T.MT

(Anggota I Dewan Penguji)

3. Hasyim Asy'ari, ST.MT

(Anggota II Dewan Penguji)

(.....)
(.....)
(.....)



Rois Fatoni, S.T., M.Sc., Ph.D

NIK. 892

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam naskah publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 26 Juli 2021

Penulis



FARADILLA FIKA SARI

D400170118

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN DIMENSI MAGNET PADA MODEL PMSG (PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR)

12 SLOT 8 POLE

Abstrak

Energi angin merupakan salah satu energi baru terbarukan yang memiliki potensi sangat besar jika dimanfaatkan di Indonesia, namun bukan berarti Indonesia belum memiliki atau belum mencoba membuat pembangkit listrik tenaga angin. Pemerintah sudah melakukan pembangunan pembangkit listrik tenaga angin di beberapa daerah, hanya saja masih belum maksimal. Dalam proses pembangkitan energi listrik terbarukan diperlukan sebuah alat konversi energi, salah satunya adalah generator. Generator sendiri adalah sebuah perangkat konversi energi yang dapat merubah energi dari energi mekanik menjadi energi listrik. *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) merupakan salah satu komponen utama pembangkit listrik tenaga angin/bayu (PLTB). Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan full model dan $\frac{1}{4}$ model PMSG dengan menggunakan *software* magnet. Rancangan ini akan dibuat dengan menggunakan kombinasi 12 slot 8 pole (12S8P). Rancangan dibuat dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh jenis tebal magnet generator sinkron. Akan dibuat 3 rancangan generator $\frac{1}{4}$ model dengan variasi magnet pada nilai 3mm, 6mm dan 9mm pada masing-masing rancangan, dengan material magnet yang digunakan adalah magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tebal magnet yang digunakan dan material magnet yang digunakan dalam perancangan generator sangat mempengaruhi nilai tegangan output yang dihasilkan. Dimana *flux* magnet pada hasil simulasi mempengaruhi nilai *back EMF*. Nilai konstanta *back EMF* tertinggi pada penelitian ini sebesar 0,21884 Vs/rad dengan tebal magnet 9mm dan menggunakan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*.

Kata Kunci: PMSG, 12S8P, Dimensi, Magnet

Abstract

Wind energy is one of the new renewable energies that has enormous potential if used in Indonesia, but that does not mean that Indonesia does not have or has not tried to build wind power plants. The government has carried out the construction of wind power plants in several areas, but it is still not optimal. In the process of generating renewable electrical energy, an energy conversion tool is needed, one of which is a generator. The generator itself is an energy conversion device that can convert energy from mechanical energy into electrical energy. Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) is one of the main components of wind/wind power plants (PLTB). In this research, the full model and model model of PMSG will be designed using magnet software. This design will be made using a combination of 12 slots 8 pole (12S8P). The design was made with the aim of analyzing the effect of thick type of magnetic synchronous generator. There will be 3 generator designs models with magnetic variations in the values of 3mm, 6mm and 9mm in each design, with the magnetic materials used are PM12 Br 1.2 nut 1.0 magnet and NdFeB magnet: Neodymium Iron Boron. The results of this study indicate that the thickness of the magnet used and the magnetic material used in the design of the generator greatly affects the value of the resulting output voltage. Where the magnetic flux in the simulation results affect the back EMF value. The highest back EMF constant

value in this study was 0.21884 Vs/rad with a magnet thickness of 9mm and using PM12 Br 1.2 T magnetic material.

Keywords: PMSG, 12S8P, Dimension, Magnet

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan garis pantai terpanjang di dunia, yaitu sebesar 108.000 km. Dengan kondisi Indonesia yang didominasi oleh perairan, Indonesia memiliki potensi energi alternatif yang lumayan tinggi jika dimanfaatkan dengan baik oleh pemerintah dan juga masyarakatnya. Energi angin dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik. Dengan bantuan beberapa alat mesin, manusia dapat mengubah angin menjadi energi listrik tenaga angin. Di Indonesia sendiri pemerintah sudah membangun beberapa Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), hanya saja belum maksimal dan masih saja ada beberapa daerah pelosok yang belum dialiri listrik.

Energi angin memiliki potensi yang bagus dan menguntungkan jika dimanfaatkan sebagai energi berkelanjutan berskala besar. Dengan menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) sebagai alat konversi dari energi angin menjadi energi listrik. PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) adalah salah satu generator sinkron yang dapat digunakan untuk memanfaatkan energi angin menjadi energi listrik. Perawatan yang rendah, kinerja tinggi, keandalan tinggi, dan kepadatan daya tinggi, menjadi keunggulan dari PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) (Prashanth, 2021).

Tren Elektronika di industri energi terbarukan sudah lama tumbuh dari 10 tahun lalu. Seperti munculnya pembangkit listrik turbin angin, tenaga surya, bio masa, dan pembangkit listrik tenaga air, dll. PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) ini dapat dikontrol kecepatan variabelnya tanpa gigi peredam kecepatan (Lertnuwat et al, 2017).

Perkembangan yang terjadi setiap waktunya membuat beberapa orang menciptakan ide-ide hebat yang dapat mempermudah pekerjaan manusia. Dengan itu munculah *software* yang dapat digunakan untuk mendesain mesin-mesin listrik. *Software MagNet* merupakan *software* yang dapat digunakan untuk mendesain model generator terlebih dahulu sebelum nantinya membuat prototipe atau sebuah hardware generator. *Software MagNet* ini berbasis *Finite Element Method* (FEM), yaitu di mana dapat digunakan untuk menghitung distribusi dari medan elektromagnetik secara kompleks dan sudah terbukti secara efektif. Generator pada dasarnya tersusun oleh tiga bagian utama yaitu rotor, stator dan air gap. Rotor merupakan bagian yang bergerak, sedangkan stator merupakan bagian yang diam, dan untuk air gap sendiri merupakan celah antara rotor dan stator.

Penelitian oleh Wahyudianto Bagus dkk (2014) yang berjudul “Kajian Teknis Gejala Magnetisasi pada Linear Generator untuk Alternatif Pembangkit Listrik” ini menyatakan bahwa jenis magnet yang bagus untuk digunakan adalah magnet induksi dengan 100 lilitan yaitu pada voltase 6 volt dapat menghasilkan fluks magnet sebesar 23.8 weber.

Penelitian Tugas akhir ini akan melakukan perancangan PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) 12 slot 8 pole dengan menggunakan *software MagNet* di mana akan dilakukan perbandingan jika dimensi magnet divariasikan pada nilai 3mm, 6mm dan 9mm. Kemudian untuk bahan material magnet pada PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) akan menggunakan magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron* untuk mendukung penelitian ini. Setelah perancangan selesai akan disimulasi dan dianalisis, dilihat pengaruh perubahan dari 3 rancangan dengan tebal magnet yang berbeda. Penelitian ini berfokus pada beda dimensi yang mempengaruhi *flux* magnet, *flux linkage*, nilai *back EMF* dan nilai konstanta *back EMF* (*Ke*).

1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka permasalahan yang akan dibahas adalah mengenai pengaruh perubahan dimensi magnet pada model PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) 12 slot 8 pole yang dimana akan divariasikan dengan tebal magnet sebesar 3mm, 6mm, dan 9mm, menggunakan material magnet berupa magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*. Kemudian akan dibandingkan besar medan magnet, dan akan mengolah data yang dihasilkan untuk mengetahui perbandingan *flux* magnet, nilai *flux linkage*, *back EMF* dan nilai konstanta *back EMF* (*KE*).

1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang dikaji maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan dimensi magnet pada *Permanent Magnet Synchronous Generator* 12 slot 8 pole.

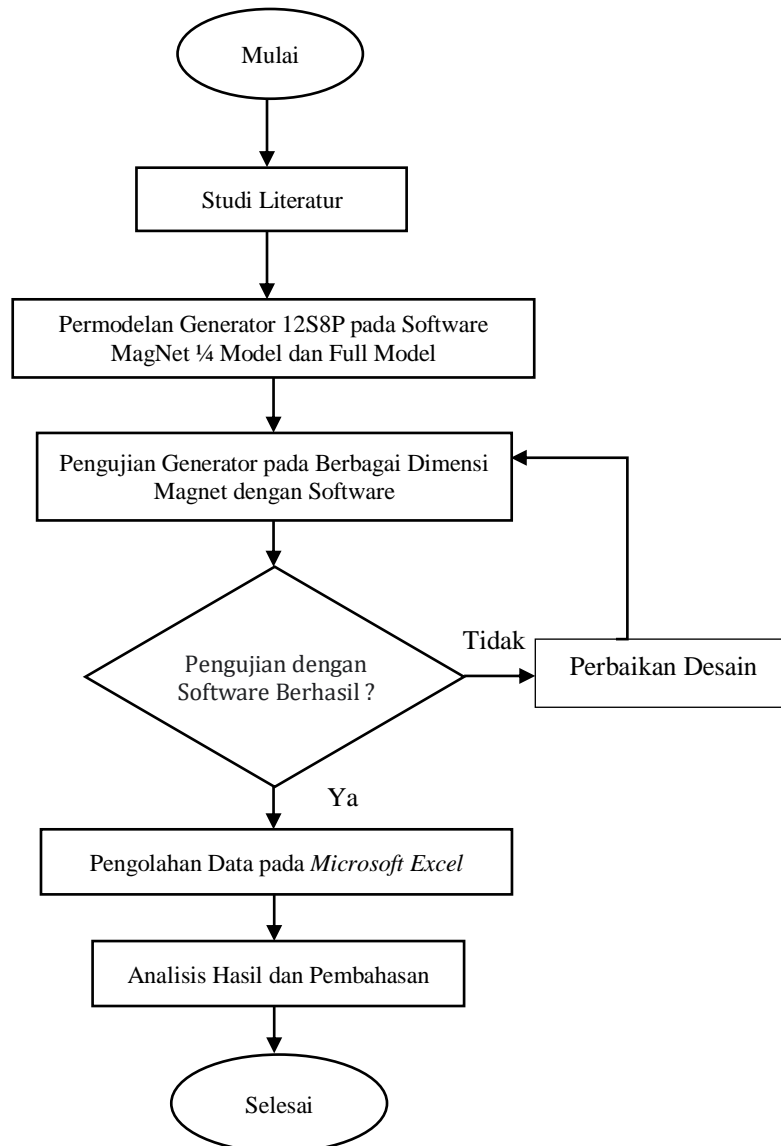
1.3 Manfaat Penelitian

1. Manfaat bagi peneliti yaitu dapat melakukan perancangan model generator menggunakan *software MagNet* dengan cara mensimulasikan, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan kecocokan bahan sebelum membuat generator tersebut.
2. Dengan adanya *software MagNet* ini dapat bermanfaat bagi peneliti karena bisa mensimulasikan generator terlebih dahulu dengan rancangan yang sudah dibuat, sehingga dapat menunjang perkembangan penelitian generator di Indonesia.

2. METODE

2.1 Rancangan Penelitian

Pada tahap ini ada beberapa tahapan yang penulis gunakan dalam penyusunan Tugas Akhir. Tahapan itu penulis tampilkan pada *flowchart* dibawah ini.



Gambar 1 *Flowchart* Tahap-Tahap Penelitian

2.2 Rancangan Generator

Perancangan sebuah generator perlu ada perhitungan saat melakukan perancangan permodelan generator. Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan ialah mengenai bahan apa saja yang akan digunakan, materialnya, kemudian ukuran setiap komponen yang digunakan, dan lain-lain. Perancangan generator ini akan dibuat dan disimulasikan pada *Software MagNet* berbasis *Finite Element Method* (FEM). Dengan spesifikasi utama generator yaitu kapasitas daya sebesar 500 Watt, tegangan maksimum sebesar 180 volt, RPM sebesar 1000 dengan 12 *slot* dan 8 *pole*. Berikut ini tabel mengenai jenis material pada komponen generator tanpa variasi yang akan digunakan dalam perancangan.

Tabel 1. Jenis Material pada Komponen Generator

Komponen	Jenis Material
Stator	Carpenter: Silicon steel
Coil	Copper: 5.77e7 Siemens/meter
Rotor	Carpenter: Silicon steel
Air Box	air

Dalam perancangan generator ini menggunakan parameter ukuran awal pada perancangan generator yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Parameter Ukuran Awal pada Generator

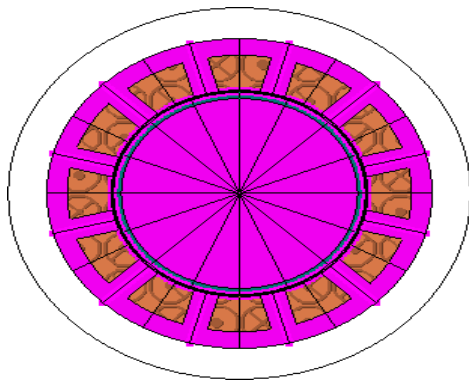
Komponen	Size (mm)
Diameter Dalam Stator	100
Diameter Luar Stator	150
Diameter Dalam Magnet	92
Diameter Luar Magnet	98
Diameter Rotor	92
Lebar Celah Udara	2

Dalam perancangan generator ini juga menggunakan jenis variasi material yang menggunakan magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*. Kemudian tebal magnet juga divariasikan pada nilai 3mm, 6mm, dan 9mm pada perancangan generator yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

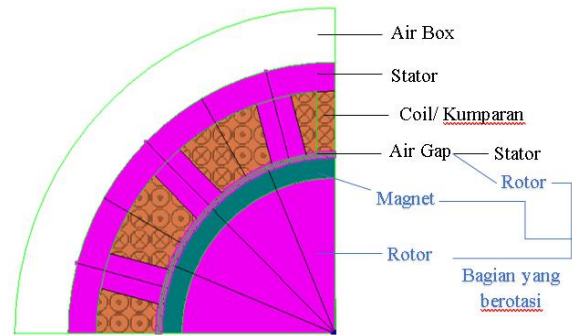
Tabel 3. Jenis Material dan Variasi Tebal Magnet

Variasi	Jenis Material	Tebal Magnet (mm)
1	<i>PM12 Br 1.2 mur 1.0</i>	3
2	<i>PM12 Br 1.2 mur 1.0</i>	6
3	<i>PM12 Br 1.2 mur 1.0</i>	9
4	<i>NdFeB: Neodymium Iron Boron</i>	3
5	<i>NdFeB: Neodymium Iron Boron</i>	6
6	<i>NdFeB: Neodymium Iron Boron</i>	9

Tabel 1 hingga 3 menguraikan mulai dari material generator yang digunakan hingga variasi pada material dan dimensi magnet. Kemudian akan dilakukan perancangan model *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), sesuai dengan data yang ada pada tabel 1 hingga 3.



Gambar 2. Full Model Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) 12S8P

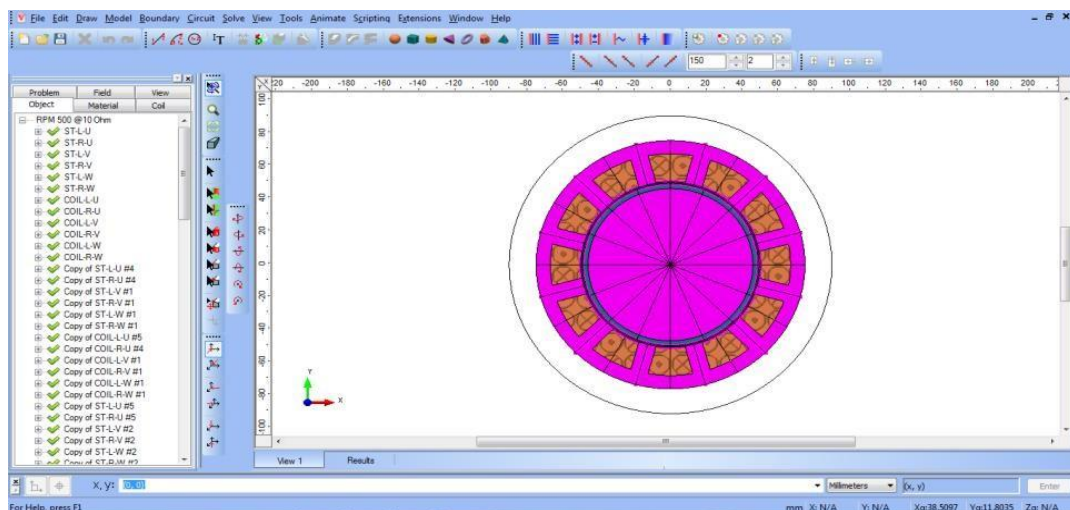


Gambar 3. ¼ Model dengan Uraian Komponen Utama pada PMSG12S8P

Gambar 2 merupakan desain full model dari PMSG 12S8P, sedangkan pada gambar 3 merupakan gambar dari ¼ model PMSG 12S8P. Gambar 3 juga menguraikan apa-apa saja komponen yang terdapat pada PMSG 12S8P, dapat dilihat jika ada bagian yang diam yaitu air box, stator, coil/kumparan, dan air gap stator. Sedangkan pada bagian yang berotasi ada magnet rotor, dan air gap milik rotor. Pada penelitian ini akan menggunakan ¼ model, di mana full model atau ¼ model akan sama saja, karena pada model generator ini akan berulang setiap 90°.

2.3 Software Magnet

Software MagNet merupakan *software* pemodelan untuk perangkat elektromagnetik dari perusahaan Infologic Design yang sudah berdiri sejak tahun 1978. Software MagNet menyediakan laboratorium virtual yang dapat digunakan untuk membuat model serta menemukan sendiri bahan material yang akan digunakan sebagai bahan inti besi, bahan magnetik maupun bahan lilitan. Dengan *software* ini kita dapat mendesain generator sendiri sesuai kebutuhan dan dapat dijadikan sebagai pengabdian masyarakat.



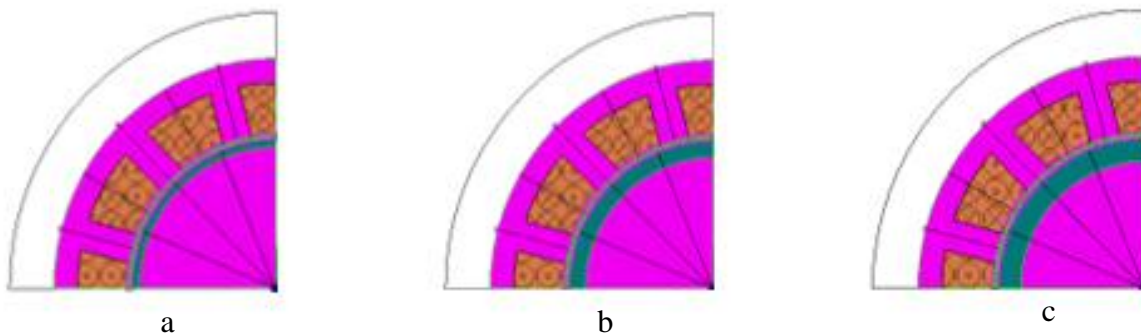
Gambar 4. Tampilan Full Model pada Software MagNet

Gambar 4 adalah tampilan utama pada *Software MagNet*, di mana kita dapat mendesain perangkat elektromagnetik lainnya. Dan bagian ini dicontohkan untuk mendesain full model PMSG 128P. *Software* ini menyediakan berbagai macam jenis material yang dapat digunakan untuk mendesain generator sesuai variasi yang dibutuhkan.

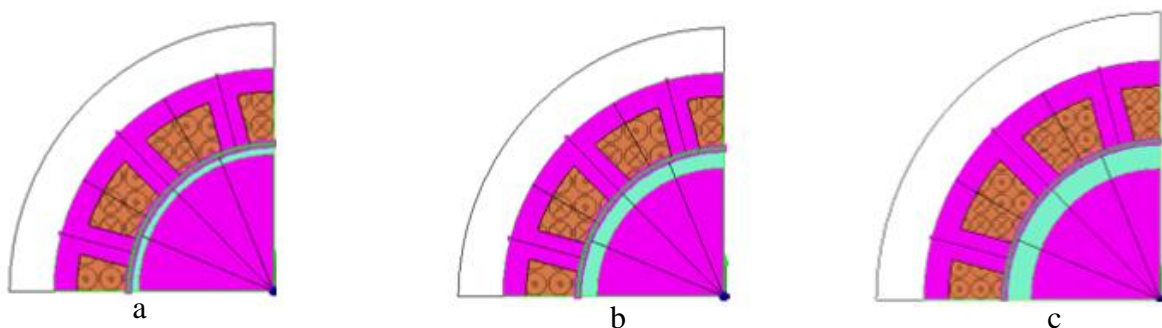
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Desain Variasi Dimensi Magnet dan Material Magnet

Perancangan yang ada dalam penelitian ini ialah $\frac{1}{4}$ model PMSG dengan 12 Slot 8 Pole. Perancangan $\frac{1}{4}$ model ini akan difokuskan pada beda dimensi magnet, dimana akan dibuat 3 buah model dengan tebal magnet 3mm, 6mm dan 9mm. Kemudian untuk mendukung penelitian ini, akan dibuat variasi bahan material pada magnet yang digunakan.

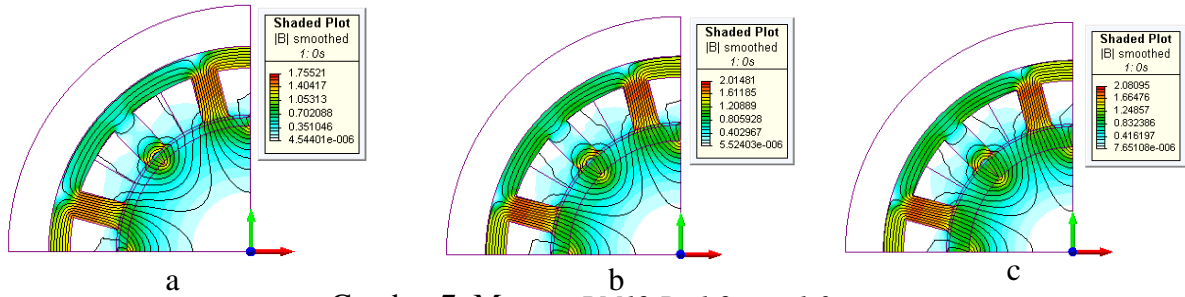


Gambar 5. $\frac{1}{4}$ Model Generator Permanent dengan Magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*
(a. Tebal Magnet 3mm, b. Tebal Magnet 6mm, c. Tebal Magnet 9mm)



Gambar 6. $\frac{1}{4}$ Model Generator Permanent dengan Magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*
(a. Tebal Magnet 3mm, b. Tebal Magnet 6mm, c. Tebal Magnet 9mm)

Gambar 5 dan 6 menunjukkan perbedaan antara bahan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*, dengan variasi tebal magnet 3mm, 6mm, dan 9mm.



Gambar 7. Magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*
(a. Tebal Magnet 3mm, b. Tebal Magnet 6mm, c. Tebal Magnet 9mm)

Gambar 7 menunjukkan aliran *flux* pada 1/4 model PMSG dengan tebal magnet 3mm, 6mm, dan 9mm. Gambar itu menunjukkan bahwa semakin berwarna merah maka kerapatan *flux* yang dihasilkan semakin tinggi. Pada rancangan 1/4 model PMSG dengan tebal magnet 9mm menghasilkan kerapatan *flux* paling tinggi.

3.2 Hasil Simulasi Variasi Dimensi Magnet

Berikut adalah hasil simulasi dari variasi dimensi magnet dengan tebal magnet 3mm, 6mm, dan 9mm menggunakan bahan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*.

3.2.1 Hasil Simulasi Flux Linkage Variasi Dimensi Magnet

Pada saat merancang 1/4 model generator dengan variasi dimensi magnet, perlu mengetahui sudut mekanik dan elektriknya. Untuk menentukan nilai sudut mekanik dan sudut elektrik, bisa menentukan nilai dengan tampilan dibawah ini:

$$\theta_{mechanic} = \frac{360^\circ}{\text{Multiplicity from slot and pole generation}} \quad (1)$$

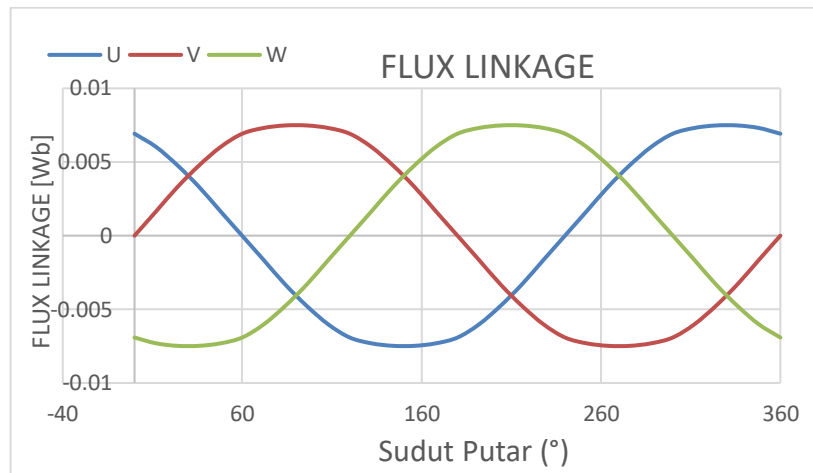
$$\theta_{electric} = \frac{pole}{2} \times \theta_{mechanic} \quad (2)$$

Dari persamaan di atas jika sudut mekanik diputar 1/4 bagian maka akan bergerak 90° . Sedangkan pada sudut elektrik jika sudut mekanik diputar 90° maka akan menghasilkan 360° secara sudut elektrik. Setelah mendapatkan data sudut mekanik dan sudut elektrik, maka dapat dilihat dari hasil simulasi atau hasil *solving*. Didapatlah hasil yaitu aliran *flux*nya dalam bentuk weber (Wb) dan juga kerapatan flux. Dimana bagian rotor akan di putar dari sudut 0° hingga 90° dengan sudut mekanik sebesar 3° maka akan menghasilkan 31 data. 31 data itu dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

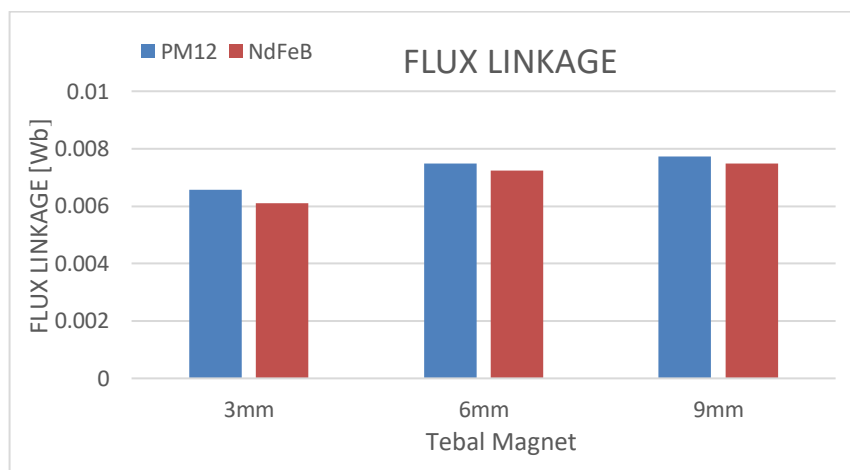
Tabel 4. Variasi Tebal 6mm dengan
Material Magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*

NO	MECHA ANGLE(°)	ELECTRIC ANGLE (°)	FLUX LINKAGE [Wb]		
			U	V	W
1	0	0	0,006919	-2,16E-06	-0,00692
2	3	12	0,006024	0,001646	-0,00731
3	6	24	0,004766	0,003311	-0,00748
4	9	36	0,003304	0,004771	-0,00748
5	12	48	0,001641	0,006023	-0,00731
6	15	60	-7,15E-06	0,006917	-0,00692
7	18	72	-0,00165	0,00731	-0,00602
8	21	84	-0,00332	0,007481	-0,00477
9	24	96	-0,00477	0,007481	-0,00332
10	27	108	-0,00602	0,007309	-0,00166
11	30	120	-0,00692	0,006917	-8,47E-06
12	33	132	-0,00731	0,006024	0,001638
13	36	144	-0,00748	0,004774	0,003299
14	39	156	-0,00748	0,003314	0,004763
15	42	168	-0,00731	0,00165	0,006021
16	45	180	-0,00692	2,11E-06	0,006917
7	48	192	-0,00602	-0,00165	0,00731
18	51	204	-0,00477	-0,00331	0,00748
19	54	216	-0,0033	-0,00477	0,007479
20	57	228	-0,00164	-0,00602	0,007308
21	60	240	7,04E-06	-0,00692	0,006916
22	63	252	0,001654	-0,00731	0,006025
23	66	264	0,003315	-0,00748	0,004775
24	69	276	0,004773	-0,00748	0,003317
25	72	288	0,006025	-0,00731	0,001656
26	75	300	0,006918	-0,00692	8,65E-06
27	78	312	0,007309	-0,00602	-0,00164
28	81	324	0,007479	-0,00477	-0,0033
29	84	336	0,00748	-0,00331	-0,00476
30	87	348	0,007309	-0,00165	-0,00602
31	90	360	0,006919	-2,16E-06	-0,00692

Setelah mendapat 31 data, seperti pada tabel 4 selanjutnya data itu bisa diolah dengan *Microsoft Excel* sehingga dapat diperoleh grafik seperti pada gambar 8 berikut.



Gambar 8. Grafik *Flux Linkage* Variasi Tebal Magnet 6mm dengan Material *PM12 Br 1.2 mur 1.0*



Gambar 9. Perbandingan Nilai *Flux Linkage*

Gambar 8 menunjukkan grafik *flux linkage* dari variasi tebal magnet 6mm dengan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*. Grafik pada gambar 8 telah sesuai dengan data yang didapat dari tabel 4, di mana bagian rotor akan diputar sebesar 3° dari sudut 0° hingga sudut 90° terhadap coil u, v, dan w. Gelombang yang dihasilkan berbentuk sinus dengan arti lain ialah aliran arus bolak-balik di mana sesuai dengan karakteristik tegangan AC. Dari grafik itu juga didapat nilai *flux linkage* sebesar 0,00748 weber untuk tebal magnet 6mm dengan bahan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*. Sedangkan pada gambar 9 menunjukkan perbandingan nilai *flux linkage* dengan variasi tebal magnet 3mm, 6mm, dan 9mm menggunakan bahan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*. Dapat dilihat dari gambar tersebut bahwa pada tebal magnet 9mm dengan bahan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* maupun magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron* memiliki nilai *flux linkage* tertinggi sebesar 0,0077186 weber dan 0,007479206 weber.

3.2.2 Hasil Perhitungan Konstanta Back EMF

Setelah didapatkan data nilai *flux linkage* kemudian dicari nilai tegangan fasa 3 coil dengan menggunakan rumus di bawah ini :

$$E_{coil} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t} \quad (3)$$

Keterangan :

E coil : Tegangan pada masing-masing kumparan

D λ : Perubahan *flux linkage* (Wb) atau $\lambda_2 - \lambda_1$

Dt : Rentang waktu 0,5ms = 0,0005 sekon

Tegangan yang didapat pada tiap kumparan itu didapat dari data nilai perubahan *flux linkage* tiap satuan waktu (milisekon). Dengan menggunakan data dari nilai *flux* di tabel 4, maka akan dihitung menggunakan rumus 3 sehingga mendapatkan nilai untuk tegangan fasa 3 coil. Dapat dilihat nilai tegangan pada tabel 5 di bawah ini dari hasil perhitungan dengan rumus 3.

Tabel 5. Nilai *Flux Linkage* dan Tegangan Fasa 3 Coil pada Variasi
Tebal Magnet 6mm dengan Material Magnet *P12 Br 1.2 mur 1.0*.

ELEC. ANGLE (°)	FLUX LINKAGE [Wb]			Tegangan Fasa 3 Coil [V]		
	U	V	W	U	V	W
0	0,006919	-2,16E-06	-0,00692	-1,78956	3,296908	-0,78536
12	0,006024	0,001646	-0,00731	-2,51497	3,329779	-0,3419
24	0,004766	0,003311	-0,00748	-2,9255	2,918821	0,002041
36	0,003304	0,004771	-0,00748	-3,32581	2,504413	0,342536
48	0,001641	0,006023	-0,00731	-3,29558	1,788923	0,783538
60	-7,15E-06	0,006917	-0,00692	-3,29403	0,785613	1,783314
72	-0,00165	0,00731	-0,00602	-3,32323	0,342091	2,500763
84	-0,00332	0,007481	-0,00477	-2,91618	-0,00114	2,916845
96	-0,00477	0,007481	-0,00332	-2,50194	-0,34233	3,320422
108	-0,00602	0,007309	-0,00166	-1,78608	-0,78491	3,294102
120	-0,00692	0,006917	-8,47E-06	-0,78151	-1,78553	3,293049
132	-0,00731	0,006024	0,001638	-0,34099	-2,49995	3,321188
144	-0,00748	0,004774	0,003299	-0,00224	-2,92006	2,928789
156	-0,00748	0,003314	0,004763	0,341202	-3,32845	2,515457
168	-0,00731	0,00165	0,006021	0,781126	-3,29564	1,792903
180	-0,00692	2,11E-06	0,006917	1,789027	-3,29625	0,784916
192	-0,00602	-0,00165	0,00731	2,515649	-3,32957	0,341443
204	-0,00477	-0,00331	0,00748	2,929553	-2,92157	-0,00266
216	-0,0033	-0,00477	0,007479	3,322185	-2,50195	-0,34228
228	-0,00164	-0,00602	0,007308	3,295848	-1,78956	-0,7831
240	7,04E-06	-0,00692	0,006916	3,294231	-0,78547	-1,78329
252	0,001654	-0,00731	0,006025	3,320769	-0,34142	-2,49989
264	0,003315	-0,00748	0,004775	2,917081	-0,00023	-2,91506
276	0,004773	-0,00748	0,003317	2,503035	0,343091	-3,32339

288	0,006025	-0,00731	0,001656	1,786102	0,784932	-3,29385
300	0,006918	-0,00692	8,65E-06	0,782067	1,78495	-3,29292
312	0,007309	-0,00602	-0,00164	0,341394	2,502609	-3,32526
324	0,007479	-0,00477	-0,0033	0,001252	2,917995	-2,92453
336	0,00748	-0,00331	-0,00476	-0,34148	3,327509	-2,51395
348	0,007309	-0,00165	-0,00602	-0,78141	3,296417	-1,79386
360	0,006919	-2,16E-06	-0,00692	-1,78956	3,296899	-0,78536

Tabel 6. Nilai Tegangan Fasa 12 Coil pada Variasi Tebal Magnet 6mm dengan Material Magnet *P12 Br 1.2 mur 1.0*.

ELEC. ANGLE (°)	Tegangan Fasa 12 Coil [V]		
	U	V	W
0	-7,15825	13,18763	-3,14146
12	-10,0599	13,31912	-1,36762
24	-11,702	11,67529	0,008163
36	-13,3032	10,01765	1,370142
48	-13,1823	7,155694	3,134154
60	-13,1761	3,142453	7,133256
72	-13,2929	1,368365	10,00305
84	-11,6647	-0,00454	11,66738
96	-10,0078	-1,36932	13,28169
108	-7,14433	-3,13963	13,17641
120	-3,12604	-7,14211	13,1722
132	-1,36396	-9,99979	13,28475
144	-0,00898	-11,6803	11,71516
156	1,364807	-13,3138	10,06183
168	3,124505	-13,1826	7,17161
180	7,15611	-13,185	3,139664
192	10,0626	-13,3183	1,365772
204	11,71821	-11,6863	-0,01064
216	13,28874	-10,0078	-1,36911
228	13,18339	-7,15824	-3,13241
240	13,17692	-3,14189	-7,13316
252	13,28307	-1,36568	-9,99958
264	11,66833	-0,00093	-11,6602
276	10,01214	1,372365	-13,2936
288	7,144406	3,139728	-13,1754
300	3,128269	7,139801	-13,1717
312	1,365577	10,01044	-13,301
324	0,005009	11,67198	-11,6981
336	-1,36592	13,31004	-10,0558
348	-3,12563	13,18567	-7,17544
360	-7,15823	13,1876	-3,14146

Tabel 5 merupakan data nilai *flux linkage* dan tegangan fasa 3 coil di mana itu didapat dari rumus sebelumnya dengan cara perhitungan seperti dibawah ini.

$$E_{coil} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta t}$$

$$E_{coil} = \frac{0,006024 - 0,006919}{0,0005} = -1,78956 \text{ volt}$$

Perhitungan di atas berdasarkan data nilai pada *flux linkage* yang ada pada tabel 5, di mana dimulai dari nilai pada sudut 3° kemudian dikurang nilai pada sudut 0° lalu dibagi rentang waktunya sebesar 0,0005 sekon. Setelah mendapatkan nilai tegangan fasa 3 coil, maka untuk mendapatkan nilai tegangan fasa generator full model atau 12 coil seperti pada tabel 6 itu didapat dengan cara dikali 4 nilai pada setiap fasa u, v, dan w pada tegangan fasa 3 coil untuk bergerak 360° pada *mechanical angle* melalui rotor.

Tabel 7. Nilai Tegangan Antar Fasa, Tegangan DC dan VDC Rata-Rata pada Variasi Tebal Magnet 6mm dengan Material Magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*.

ELEC. ANGLE (°)	Tegangan Antar Fasa [V]			VDC [V]	Tegangan DC Rata-Rata [V]
	U	V	W		
0	-20,3459	16,32909	4,016793	20,34588	22,07774561
12	-23,379	14,68673	8,692266	23,379	
24	-23,3773	11,66712	11,71017	23,3773	
36	-23,3209	8,64751	14,67337	23,32088	
48	-20,338	4,02154	16,31648	20,33802	
60	-16,3186	-3,9908	20,30937	20,30937	
72	-14,6613	-8,63469	23,29598	23,29598	
84	-11,6602	-11,6719	23,3321	23,3321	
96	-8,63845	-14,651	23,28946	23,28946	
108	-4,00469	-16,316	20,32073	20,32073	
120	4,016067	-20,3143	16,29824	20,3143	
132	8,635826	-23,2845	14,64872	23,28454	
144	11,67128	-23,3954	11,72414	23,39542	22,07774561
156	14,67861	-23,3756	8,697021	23,37563	
168	16,30708	-20,3542	4,047105	20,35419	
180	20,34112	-16,3247	-4,01645	20,34112	
192	23,38089	-14,6841	-8,69682	23,38089	
204	23,4045	-11,6756	-11,7288	23,4045	
216	23,29655	-8,63869	-14,6579	23,29655	
228	20,34163	-4,02583	-16,3158	20,34163	
240	16,31882	3,991266	-20,3101	20,31008	
252	14,64876	8,633893	-23,2826	23,28265	
264	11,66926	11,65929	-23,3285	23,32855	
276	8,639776	14,66592	-23,3057	23,3057	
288	4,004678	16,31514	-20,3198	20,31981	
300	-4,01153	20,31149	-16,3	20,31149	
312	-8,64486	23,31146	-14,6666	23,31146	
324	-11,667	23,37011	-11,7031	23,37011	
336	-14,676	23,36582	-8,68987	23,36582	
348	-16,3113	20,36111	-4,04981	20,36111	
360	-20,3458	16,32905	4,016774	20,34583	

Pada tabel 6 berisi data nilai tegangan antar fasa, tegangan DC, dan VDC rata-rata. Untuk

mendapatkan nilai tegangan fasa seperti pada tabel 6, didapat dari nilai selisih tegangan antara fasa coil u, v, dan w, sehingga didapatlah nilai tegangan antar fasa. Mekanisme dapat dilihat di bawah ini.

$$E_{U-V} = E_U - E_V \quad (4)$$

$$E_{V-W} = E_V - E_W \quad (5)$$

$$E_{W-U} = E_W - E_U \quad (6)$$

Keterangan : E_U : Tegangan fasa coil U

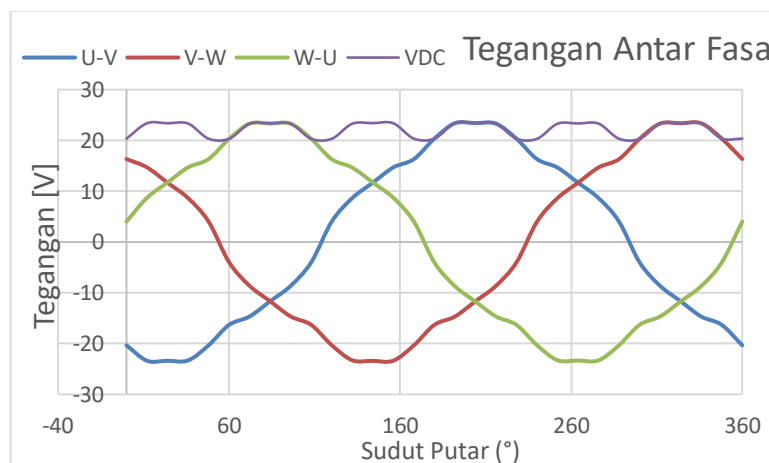
E_V : Tegangan fasa coil V

E_W : Tegangan fasa coil W

Nilai tegangan DC didapat dari nilai absolut tertinggi pada tegangan antar fasa di setiap sudut elektrik. Sedangkan untuk nilai tegangan DC rata-rata didapat dari data nilai pada tegangan DC dijumlahkan, kemudian dibagi sebanyak data nilai pada tegangan DC yaitu sebanyak 31. Mekanisme dapat dilihat seperti di bawah ini.

$$\text{Tegangan DC rata-rata} = \frac{\text{Jumlah seluruh nilai tegangan DC}}{\text{Total data pada tegangan DC}} \quad (7)$$

$$\text{Tegangan DC rata-rata} = \frac{648,410114}{31} = 22,07774561 \text{ Volt}$$



Gambar 10. Grafik Antara Fasa Variasi Tebal Magnet 6mm dengan Bahan Material *PM12 Br 1.2 mur 1.0*

Setelah didapatkan nilai tegangan DC rata-rata sebesar 22,0777457 volt, nilai tegangan DC rata-rata ini dapat digunakan untuk menghitung nilai Konstanta K_e (Konstanta *Back EMF*) yaitu nilai tegangan tiap satu putaran dengan rumus:

$$K_e = \frac{V_{DC \text{ rata-rata}}}{\omega} \quad (8)$$

Nilai ω didapat dari rumus $\omega = 2\pi f$, dimana untuk f didapat dari $\frac{1}{T}$.

$$f = \frac{1}{T} \quad (9)$$

Keterangan:

f = Frekuensi (Hz)

T = Periode waktu *mechanical angle* 360°

T merupakan rentang waktu dalam setiap 3° adalah 0,5 ms atau 0,0005 sekon sehingga untuk memutar hingga 360° atau dalam satu putaran membutuhkan 120 pergerakan, maka:

$$T (360^\circ) = 0,0005 \times 120 = 0,06 \text{ sekon, dan } f = \frac{1}{0,06} = 16,6667 \text{ Hz}$$

Setelah didapatkan nilai frekuensi sebesar 16,6667 Hz, selanjutnya dicari nilai kecepatan angular (ω).

$$\omega = 2\pi f \quad (10)$$

$$\omega = 2 \times 3,14 \times 16,6667 = 104,667 \text{ rad/s}$$

Didapatlah nilai ω sebesar 104,6667 rad/s. Setelah mendapatkan nilai ω , maka nilai K_e (Konstanta *Back EMF*) bisa didapat dengan rumus di bawah ini.

$$K_e = \frac{VDC \text{ rata - rata}}{\omega}$$

- Tebal Magnet 3mm

- *PM12 Br 1.2 mur 1.0*

$$K_e = \frac{18,2970593}{104,667} = 0,17482 \text{ Vs/rad}$$

- *NdFeB: Neodymium Iron Boron*

$$K_e = \frac{16,8623396}{104,667} = 0,16111 \text{ Vs/rad}$$

- Tebal Magnet 6mm

- *PM12 Br 1.2 mur 1.0*

$$K_e = \frac{22,0777457}{104,667} = 0,21094 \text{ Vs/rad}$$

- *NdFeB: Neodymium Iron Boron*

$$K_e = \frac{20,9353933}{104,667} = 0,20002 \text{ Vs/rad}$$

- Tebal Magnet 9mm

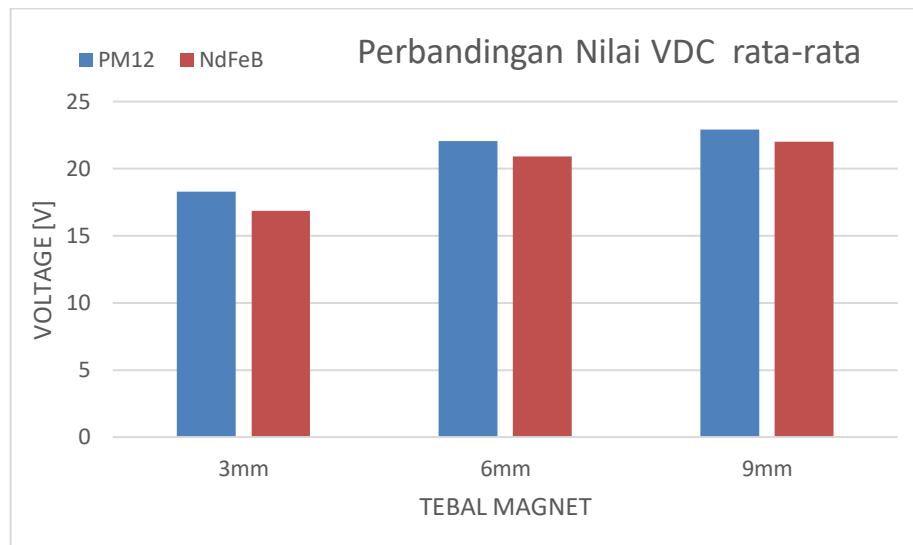
- *PM12 Br 1.2 mur 1.0*

$$K_e = \frac{22,9046697}{104,667} = 0,21884 \text{ Vs/rad}$$

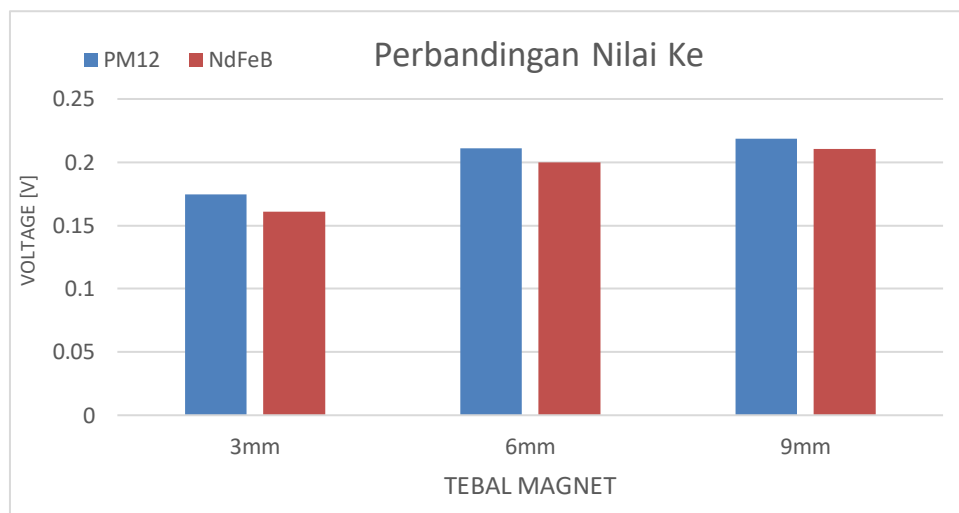
- *NdFeB: Neodymium Iron Boron*

$$K_e = \frac{22,0313631}{104,667} = 0,21050 \text{ Vs/rad}$$

Setelah mendapatkan nilai VDC rata-rata dan nilai Ke pada tiap variasi tebal magnet yang berbeda yaitu 3mm, 6mm, dan 9mm dengan menggunakan bahan material magnet berupa magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan magnet *NdFeB: Neodymium Iron Boron*. Maka dengan data nilai VDC rata-rata dan nilai Ke tersebut bisa ditampilkan grafik perbandingannya.



Gambar 11. Perbandingan Nilai Tegangan DC Rata-Rata



Gambar 12. Perbandingan Nilai Ke (Konstanta Back EMF)

Gambar 11 menunjukkan perbandingan nilai VDC rata-rata pada variasi tebal magnet 3mm, 6mm, dan 9mm dengan bahan material magnet berupa *PM12 Br 1.2 mur 1.0* dan *NdFeB: Neodymium Iron Boron*. Nilai VDC rata-rata tertinggi adalah pada variasi tebal magnet 9mm dengan bahan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0* yaitu sebesar 22,9046697 volt. Sedangkan pada gambar 12 menunjukkan perbandingan nilai Ke, dimana nilai Ke tertinggi sebesar 0,21884 Vs/rad untuk tebal magnet 9mm dan menggunakan bahan material magnet *PM12 Br 1.2 mur 1.0*.

4. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian ini pada rancangan PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) 12 Slot 8 Pole dengan variasi dimensi magnet, dapat disimpulkan bahwa:

- a. Penelitian ini menggunakan rancangan $\frac{1}{4}$ model PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) 12 Slot 8 Pole agar lebih cepat dan efisien dalam proses *solving*. Namun hasil yang ditampilkan dalam penelitian ini setara dengan hasil full model, karena pada rancangan ini menggunakan fungsi dari *Boundary Condition*.
- b. *Flux* magnet pada hasil simulasi sangat mempengaruhi nilai pada *Back EMF*.
- c. Pada variasi tebal magnet 3mm, 6mm, 9mm membuktikan bahwa ketebalan magnet yang digunakan dan material magnet yang digunakan pada perancangan generator sangat mempengaruhi pada tegangan *output* yang dihasilkan generator. Dimana semakin besar dimensi magnet atau tebal magnetnya maka penyebaran *flux* menjadi lebih luas dan dapat menghasilkan tegangan yang lebih baik. Dan untuk pengujian perbandingan pengaruh tebal magnet ditunjukkan dengan nilai konstanta *back EMF* terbesar sebesar 0,21884 Vs/rad dengan menggunakan variasi dimensi magnet 9mm dan material magnet berupa *PM12 Br 1.2 mur 1.0*.

PERSANTUNAN

Segala puji bagi Allah SWT atas nikmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Sholawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu mendoakan dan memberi dukungan penuh kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
2. Bang Ricky Elson dan segenap Tim LBN, karena dari sanalah ide ini muncul hingga dapat membuat dan menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Aris Budiman S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan pengarahan kepada penulis.
4. Bapak dan ibu dosen prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah mengajarkan banyak ilmu dan memberi nasehat selama perkuliahan.
5. Kak ji dan Jongu yang telah memberikan semangat kepada penulis kemudian temen-temen mahasiswa angkatan 2017 prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- Anam, C., Nurhadi, N., & Irfan, M. (2017). Perancangan Generator 100 Watt Menggunakan Software Magnetik Infolytica. *Kinetik*, 2(1), 27–36. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v2i1.125>
- J, W., Sudjadi, Karnoto, T, S., I, S., & A, D. (2018). Effect of Geometry Generator Variation Design 12 Slot 8 Pole on Power Efficiency Design. *Journal of Electrical Engineering and Electronic Technology*, 07(02), 2–7. <https://doi.org/10.4172/2325-9833.1000161>
- Lertnuwat, C., & Oonsivilai, A. (2017). Stability for Wind Turbine using Observer method with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). *Energy Procedia*, 138, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.076>
- Nugroho, W. B., Kusuma, I. R., & Sarwitto, S. (2014). Kajian Teknis Gejala Magnetisasi pada Linear Generator untuk Alternatif Pembangkit Listrik. *Teknik Pomits*, 3(1), 95–98.
- Pole, S., Software, M., Arifianto, I., & Hs, M. R. (2018). Analisa Efisiensi dan Rancang Generator Permanent Magnet. 43–48.
- Prashanth, N. A. (2021). Materials Today: Proceedings Flux maximization in wind turbine permanent magnet synchronous generator made of NdFeB permanent magnets. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.224>